第38卷 第4期
2021年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

紫穗槐直根力学性质研究

白潞翼[1]， 刘 静[1]， 胡晶华[1]， 张 欣[2]， 李诗文[1]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010019；
2. 水利部牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010020）

摘 要：为探究承受轴向荷载和径向荷载时植物根系材料力学特性的差异性，针对水土流失地区常见植物种紫穗槐1~5 mm径级范围内直根，采用TY8000伺服控制试验机，研究在2种荷载下根系强度特征、本构特征及弹性变形性质。结果表明：(1) 在轴向荷载、径向荷载下，直根极限力与根径幂函数正相关，极限强度与根径幂函数负相关；(2) 直根本构曲线在轴向荷载及径向荷载下均表现为由弹性变形过渡到塑性变形，且直根极限应力、弹性应力均无差异性；但轴向荷载下的极限应变(15.04%)及弹性应变(2.71%)显著小于径向荷载(20.39%、4.19%)；(3) 直根的拉伸弹性模量及弯曲弹性模量均与根径幂函数负相关，抗拉刚度及抗弯刚度与根径幂函数正相关，轴向荷载下各径级平均弹性应力占极限应力的百分比(50.45%)显著大于径向荷载(34.08%)。总体而言，紫穗槐根系在轴向荷载下表现出更优良的弹性性能，紫穗槐更适宜栽种于主荷载类型为轴向荷载的风力、水力侵蚀区域。

关键词：轴向荷载；径向荷载；强度；变形；紫穗槐

植物根系提高土壤稳定性的作用已被广泛认可[1]，根系与土体交叉缠绕形成根土复合体，既满足植物对水肥的需求，也增强了土体的强度。根土复合体的强度取决于单根力学性质及根-土界面的摩阻特性。当土体发生移动时，受根-土界面摩擦力的制约，大多数根系随土移动而处于轴向受拉状态，穿过土体挫动面的根系受到土体挫动导致的径向荷载。目前对轴向荷载下根系力学特性的研究已较为系统：植物根系强度特征受植物种、径级及栽培方式影响[2]，且根系属于弹塑性材料[3]，弹性变形性质是影响根系固土性能的重要因子[4]。但对于承受径向荷载时根系力学性质的研究较少，仅有刘鹏飞[5-6]等对陕蒙交界处广泛分布的北沙柳(*Salix psammophila*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、中国沙棘(*Hippophae rhamnoides*)单根在径向荷载下极限力、极限强度的相关报道，而未涉及径向受力下的根系弹性变形性质。研究表明，径向荷载下根系弹性力学性质是影响植物抵抗大风拉拔过程及根系锚固效果的关键因素[7-8]。此外，针对侵蚀类型进行精准植被建设时，需根据根系的易损荷载类型进行选择，而对同种植物根系在不同荷载类型下的力学性质差异性的研究侧重于力与强度，缺少对变形性质差异的研究。综上所述，对同种植物分别承受轴向、径向荷载下根系强度特征及变形性质进行系统研究有充分的现实意义。

紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)是一种分布范围较广的落叶灌木，因其耐寒、耐旱特性及良好的改良土壤作用，被广泛种植于西北干旱区。本试验以陕蒙交界处紫穗槐直根为研究对象，研究直根在轴向荷载及径向荷载下强度特征及变形特性，进一步完善干旱区灌木根系固土的力学机制，并为该地区造林树种选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

研究区位于陕西省神木市大柳塔试验区，该地区风力侵蚀、重力侵蚀严重。前期对该地区土壤与植物根系摩阻特性的研究表明，该地区土壤质地为粉土质砂，土壤与根表面的摩阻特性使直根在受到外营力时保持稳定[9]。根系所受外部荷载分为轴向荷载及径向荷载，受力分析见图1。轴向荷载下，直

收稿日期：2020-10-20； **修订日期：**2021-01-24
基金项目：内蒙古科技计划项目"呼包鄂榆生态功能区发挥根系持续固土力学特性的精准植被建设技术"(201802107)
作者简介：白潞翼(1996-)，男，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: 18235500490@163.com
通讯作者：刘静. E-mail: ljing58@126.com

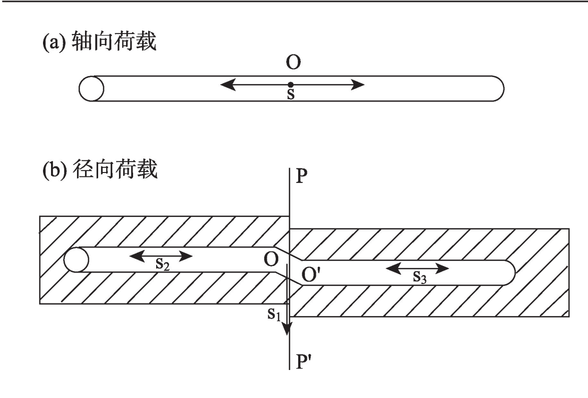


图1 单根受力分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single root stress analysis

根仅发生轴向应变s;径向荷载下,穿过挫动面PP′的根段受到剪力作用发生剪切形变s_1,而距错动面较远的直根则受到拉力作用,发生轴向形变s_2、s_3,O、O′处发生弯曲形变。参照王博等[10]试验设计,将这种根系同时受到拉、剪作用受力类型定义为拉剪组合力,对应的强度、弹性模量;刚度依次为拉剪组合强度、弯曲弹性模量、抗弯刚度。

1.2 材料采集及制备

根系采集于大柳塔试验区水土保持示范园区,采集时间为2019年8月。在紫穗槐样地上随机选取20株生长良好的紫穗槐,测其株高、冠幅、地径,其平均值作为标准株数据,并确定标准株株龄。紫穗槐标准株数据为株高(156±33.67)cm,冠幅(150.25±33.20)cm,地径(8.59±1.02)mm,株龄为10 a(图2)。依照标准株选取试验株进行挖掘,由于所需紫穗槐根系水平分布于0~50 cm土层中[11],为保证试验株存活,采取部分挖掘法,在植株的一侧向下挖掘50 cm,随后向植株方向推进,并挑剪径级均匀、表皮完整的直根作为试验根。室内对试验根进行筛选处理,试验根总长8 cm,两端各留2 cm为夹具夹持部分,试验根形状见图3,阴影处为夹具夹持部分,取A、B、O三点根径平均值为该根根径,测量方法为十字交叉法。

预试验发现,根径>5 mm时,轴向、径向荷载下根段夹持处易受力损坏,断裂点多位于仪器夹具夹持处;而根径<1 mm时,常发生夹具无法夹紧根段而滑出的现象,因此本试验根径范围定为1~5 mm。以往研究中根径划分常以1 mm为一径级组,由于紫穗槐直根的强度、变形特征随根径变化规律尚未探明,本试验按0.5 mm为一径级组,共8个径级组,每组均重复30根。根系保存于恒温冷藏柜中(温度:



图2 主根根截面图

Fig. 2 Schematic diagram of taproot section

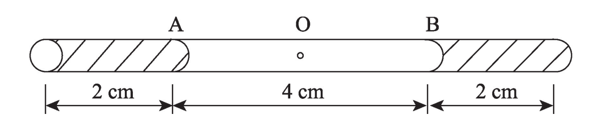


图3 直根形状示意图

Fig. 3 Schematic diagram of straight root shape

4 ℃,湿度:70%),试验周期为一周。

1.3 试验仪器及试验方法

1.3.1 试验仪器 试验仪器为TY8000伺服控制试验机及其配套夹具,本试验中直根截面形状视为圆形。

1.3.2 抗拉试验方法 参照根系拉伸试验方法[5],试验根两端固定于仪器夹具,仪器对根系施加定速轴向荷载,使直根处于受拉状态。为探究受力过程中根系直根变形性质,仪器加载速率设为10 mm·min^{-1}。仪器自动生成荷载-位移曲线(F-s曲线),抗拉力为直根断裂瞬间轴向荷载值,并计算抗拉强度,计算公式为:

$$P_1 = 4F_1 / \pi D^2 \quad (1)$$

式中:P_1为抗拉强度(MPa);F_1为抗拉力(N);D为根径(mm)。

1.3.3 抗拉剪试验方法 参照三点弯曲试验法[12],将试验根两端固定于仪器夹具,使其处于超静定状态,仪器对直根中心O点处施加定速径向荷载,使直根中心处于剪切状态,根系两端处于受拉状态,仪器加载速率为10 mm·min^{-1}。仪器自动记录荷载-位移曲线(F-s曲线),极限抗拉剪组合力为直根断裂瞬

间径向荷载值,并计算极限抗拉剪强度,计算公式为:

$$P_2 = 4F_2/\pi D^2 \tag{2}$$

式中:P_2为抗拉剪强度(MPa);F_2为抗拉剪组合力(N)。

1.3.4　*本构试验方法*　根据前文提到的F-s曲线,可计算相应的应力–应变曲线(σ-ε曲线),并对其进行本构特性分析,根据材料力学,应力的计算公式为:

$$\sigma_1 = 4F_1/\pi D^2 \tag{3}$$

应变的计算公式为:

$$\varepsilon_1 = S_1/L \tag{4}$$

式中:S_1为试验根系轴向伸长量(mm);L为受力根段长度(mm)。

1.3.5　*弹性模量及刚度计算方法*　直根拉伸弹性模量即σ-ε曲线拐点处斜率,拉伸弹性模量计算公式为:

$$E = \sigma_0/\varepsilon_0 \tag{5}$$

式中:σ_0为σ-ε曲线拐点处对应应力值(MPa);ε_0为σ-ε曲线拐点处对应应变值。

参照三点弯曲试验法,根据F-s曲线,找其斜率变化点处对应的力与位移值,直根弯曲弹性模量计算公式为:

$$E_b = L^3F_2/48IS_2 \tag{6}$$

式中:S_2为试验根系径向伸长量(mm);I为材料横截面对弯曲中性轴的惯性矩(mm^4),$I = \pi D^4/64$。

刚度计算参照《材料力学》[13]。抗拉刚度为EA,A为根截面面积,抗弯刚度为E_bI。

1.4　数据处理及统计

数据处理及统计采用Excel 2010和SPSS 20.0软件,差异性检验采用最小显著极差法(LSR),图标制作采用Origin 9.5。

2　结果与分析

2.1　紫穗槐直根极限力及极限强度

排除断裂点位于夹具夹口处的无效数据,以试验根段断裂时的轴向荷载作为直根抗拉力,并计算抗拉强度(图4、图5)。由图4、图5可知,1~5 mm径级范围内,紫穗槐直根平均径级由(1.25±0.19)mm增加至(4.82±0.27)mm,直根抗拉力由(47.98±19.06)N增加至(208.93±73.23)N,与根径呈幂函数正相关。而随根径的增加,直根抗拉强度由(40.43±16.24)MPa减小至(11.65±4.81)MPa,与根径呈幂函数负相关。表明根径较大的根可以抵抗更大的拉力,但单位面积承受的轴向荷载小于根径较小的根。

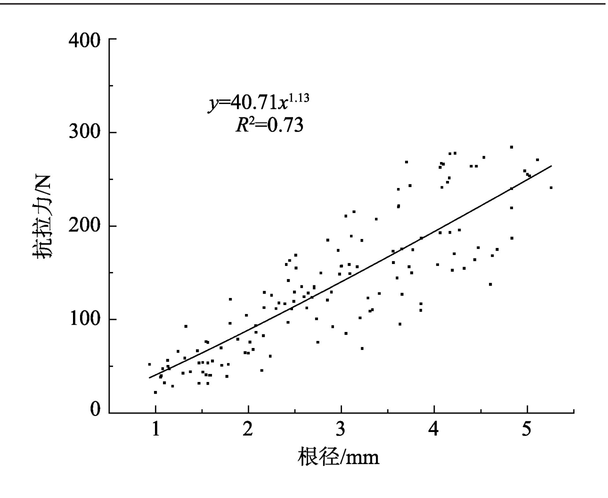


图4　直根抗拉力

Fig. 4　Tensile force of straight root

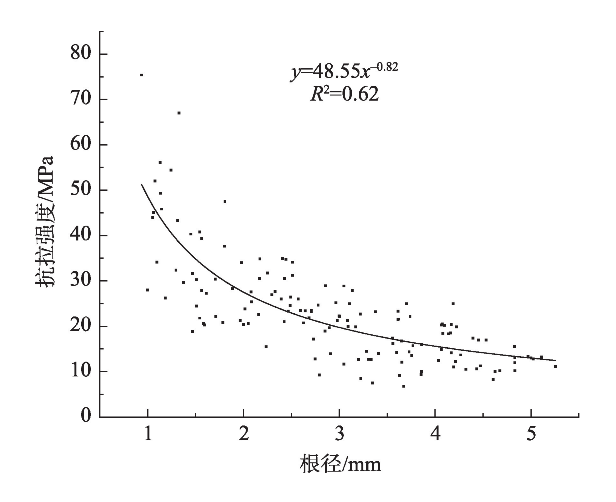


图5　直根抗拉强度

Fig. 5　Tensile force of straight root

图6、图7为径向荷载下,紫穗槐直根极限力及极限强度。1~5 mm径级范围内,紫穗槐直根平均径级由(1.26±0.15)mm增加至(4.80±0.22)mm,直根抗拉剪组合力由(40.90±22.70)N增加至(262.92±119.9)N,与根径呈幂函数正相关。而随根径的增加,直根抗拉剪强度由(31.88±14.91)MPa减小至(12.91±3.15)MPa,与根径呈幂函数负相关。与直根在轴向荷载下的强度特征表现相同。

2.2　紫穗槐直根本构性质

材料的本构特性可以反映其受力变形过程。对紫穗槐极限力试验中得到的极限力、极限位移进

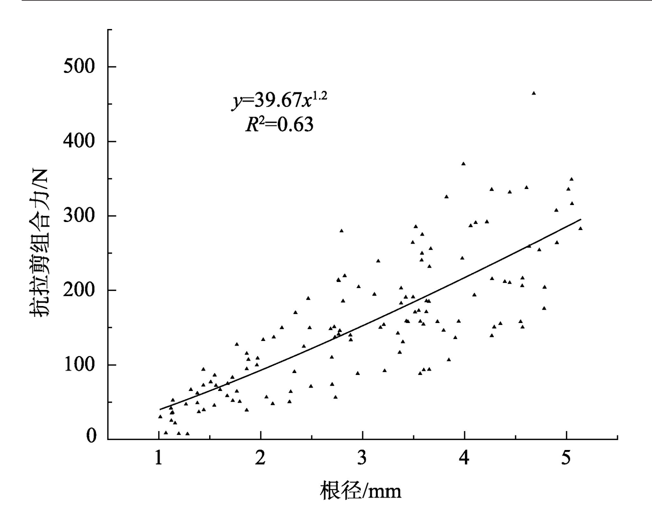


图6 直根抗拉剪组合力

Fig. 6 Shear-tension combine force of straight root

表1 2种受力形式直根各径级平均极限应力、极限应变

Tab. 1 The average ultimate stress and ultimate strain of each diameter of the straight root under two mechanical types

根径/mm	轴向荷载		径向荷载	
	应力/MPa	应变/%	应力/MPa	应变/%
1~1.5	40.43	14.51	37.58	19.84
1.5~2	27.19	13.38	34.28	21.91
2~2.5	24.39	15.75	27.95	20.39
2.5~3	21.11	16.16	22.87	20.87
3~3.5	16.99	15.18	20.07	20.82
3.5~4	14.31	14.6	17.23	16.58
4~4.5	13.08	16.53	14.76	22.73
4.5~5	10.15	14.22	12.91	19.99

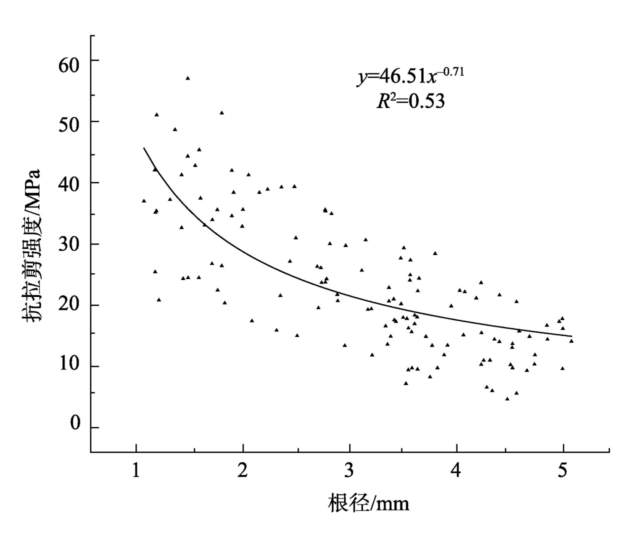


图7 直根抗拉剪组合强度

Fig. 7 Shear-tension combine strength of straight root

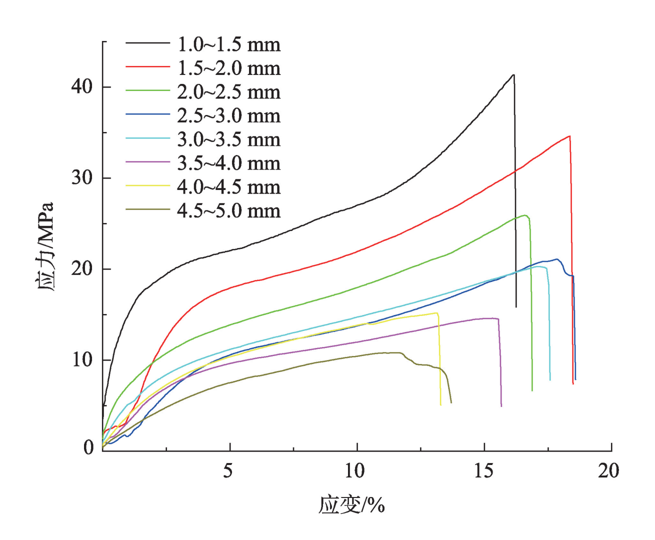


图8 轴向荷载下直根σ-ε曲线

Fig. 8 The σ-ε curve of straight root under axial load

行处理，可求得每一条根的σ-ε曲线，以及极限应力与极限应变。由表1可知，分别承受2种荷载下，直根极限应力均与根径呈负相关。随根径的增大，轴向荷载下，平均极限应力由40.43 MPa下降至10.15 MPa，径向荷载下，平均极限应力由37.58 MPa下降至12.91 MPa，两种荷载下极限应力无差异性。紫穗槐直根在径向荷载下极限应变(16.58%~22.73%)显著大于轴向荷载(13.38%~16.53%)，而与根径无关。

由于每条直根均对应一条σ-ε曲线，且每条σ-ε曲线间存在差异。由表1可知，2种荷载下，极限应力均与根径呈负相关，极限应变与根径无相关性。为便于比较，选取每个径级范围中极限应力最接近该径级平均极限应力的σ-ε曲线作为该径级的代表性曲线(图8、图9)。由图8可知，轴向荷载下，1~5

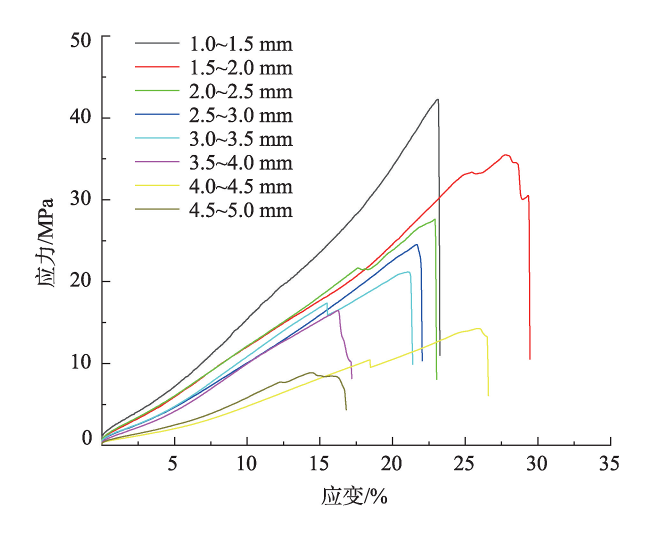


图9 径向荷载下直根σ-ε曲线

Fig. 9 The σ-ε curve of straight root under radial load

mm紫穗槐直根发生单位应变所需应力先保持恒定,后逐渐减小,根段应力应变曲线呈上凸形。根段先发生弹性变形,后发生塑性变形,且2个阶段过渡较为明显。而径向荷载下,1~5 mm紫穗槐直根发生单位应变所需应力则随应变增加而先缓慢增加,后快速增加,直至断裂,根段应力-应变曲线呈下凹形。分别承受2种荷载下,不同根径根段σ-ε曲线差异表现在根径越小,曲线斜率越大,发生单位应变所需应力越大;极限应力越大,即强度越大。

2.3　紫穗槐单根弹性极限及弹性力学指标

由紫穗槐本构性质可知,2种荷载下,1~5 mm紫穗槐直根变形过程可分为2个阶段,即弹性变形与塑性变形。弹性变形是根段有效承受外部荷载的阶段,而弹性极限即本构曲线上斜率拐点处,对2种荷载下紫穗槐直根弹性极限点处的应力应变值及所占极限应力应变值比例进行统计(表2)。由表2可得,轴向荷载下,弹性极限点处应力与根径呈负相关,随根径的增大,应力由17.24 MPa下降至6.89 MPa,占极限应力百分比范围为41.63%~67.86%,随根径的增加,占比不断增大;弹性极限点处应变为2.08%~3.45%,占极限应变百分比为13.38%~25.78%,与根径无相关性。径向荷载下,弹性极限点处应力与根径呈负相关,随根径的增大,应力由9.39 MPa下降至5.53 MPa,占极限应力百分比范围为24.10%~44.63%;弹性极限点处应变为2.08%~5.69%,占极限应变百分比为10.46%~34.32%,随根径的增加,弹性极限点处应力、应变占比均不断增大。

紫穗槐直根分别承受轴向荷载、径向荷载时,极限应力无差异,而轴向荷载下弹性极限点处的应力、所占百分比显著大于径向荷载下同径级直根,极限应变、弹性极限点处应变及所占百分比均显著小于径向荷载下同径级直根,表明紫穗槐直根在轴向荷载下的弹性性质优于径向荷载,在轴向荷载下可以抵抗更多的应力,发生更小的应变,表现出更好的固土能力。

由图10、图11所示,1~5 mm紫穗槐直根拉伸弹性模量及弯曲弹性模量均与根径呈幂函数负相关,根径较小时,拉伸弹性模量与弯曲弹性模量均较高,随根径增大,弹性模量迅速下降,当根径超过2 mm时,下降速度逐渐减慢。2~5 mm直根平均拉伸弹性模量、平均弯曲弹性模量仅为1~2 mm直根段的10.60%、54.78%。表明在单位应变下,紫穗槐1~2 mm直根可承受更多的应力。

利用根系弹性模量可进一步计算根段抗拉刚度,抗弯刚度。刚度越大,材料发生变形所需外力越大。图12、图13为紫穗槐直根抗拉刚度及抗弯刚度,1~5 mm紫穗槐直根抗拉刚度、抗弯刚度均与根径呈幂函数正相关。随根径的增加,各径级直根平均抗拉刚度由(956.44±571.77)N增加至(4251.68±2051.20)N,平均抗弯刚度由(4167.53±2013.11)N*mm^{2}增加至(25938.65±8528.47)N*mm^2,增长幅度明显。

3　讨论

根系作为生物材料,其结构的不均质性导致其力学性质受物种及根径的影响。轴向荷载下,紫穗槐直根抗拉力与根径呈幂函数正相关,抗拉强度与根径呈负相关,与绝大多数植物如狗牙根(*Cynodon*

表2　各径级直根弹性极限点处应力、应变特征值

Tab. 2　Stress and strain values at elastic limit points of each diameters

根径/mm	轴向荷载						径向荷载					
	弹性应力	极限应力	百分比	弹性应变	极限应变	百分比	弹性应力	极限应力	百分比	弹性应变	极限应变	百分比
1~1.5	17.24	40.43	42.63	2.69	14.51	18.56	9.39	37.58	24.98	2.08	19.84	10.46
1.5~2	11.73	27.19	43.13	3.45	13.38	25.78	8.54	34.28	24.92	2.51	21.91	11.45
2~2.5	10.38	24.39	42.58	2.08	15.75	13.23	6.74	27.95	24.10	2.90	20.39	14.24
2.5~3	8.79	21.11	41.63	2.50	16.16	15.47	8.28	22.87	36.22	4.75	20.87	22.76
3~3.5	8.37	16.99	49.29	2.44	15.18	16.10	8.22	20.07	40.93	5.27	20.82	25.32
3.5~4	8.05	14.31	56.24	2.15	14.60	14.72	7.24	17.23	42.02	5.69	16.58	34.32
4~4.5	7.88	13.08	60.24	3.00	16.53	18.15	6.59	14.76	44.63	5.56	22.73	24.45
4.5~5	6.89	10.15	67.86	3.33	14.22	23.44	5.53	12.91	42.84	4.76	19.99	23.80

注:弹性应力、应变即σ-ε曲线拐点处应力(MPa)、应变值(%)。

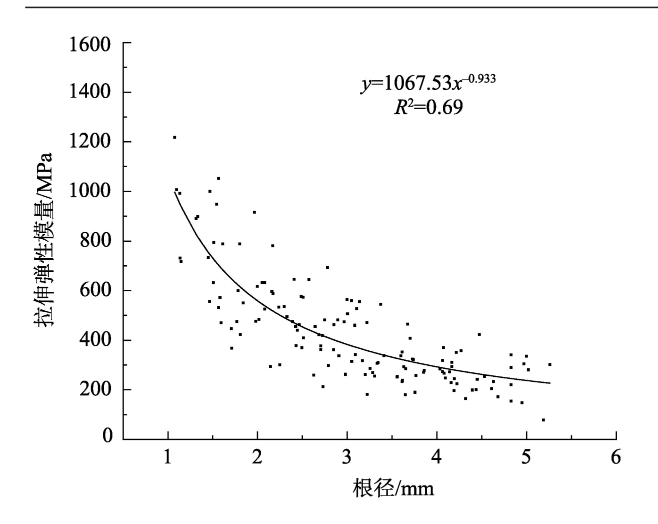


图10 直根拉伸弹性模量

Fig. 10 Tensile modulus of straight root

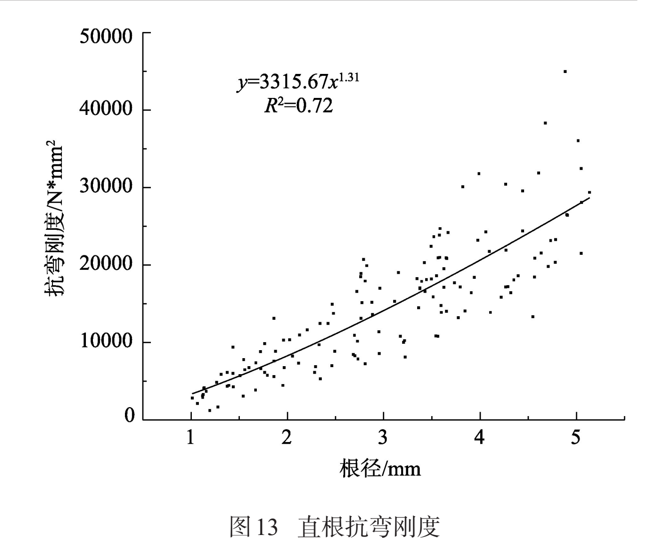


图13 直根抗弯刚度

Fig. 13 Bending stiffness of straight root

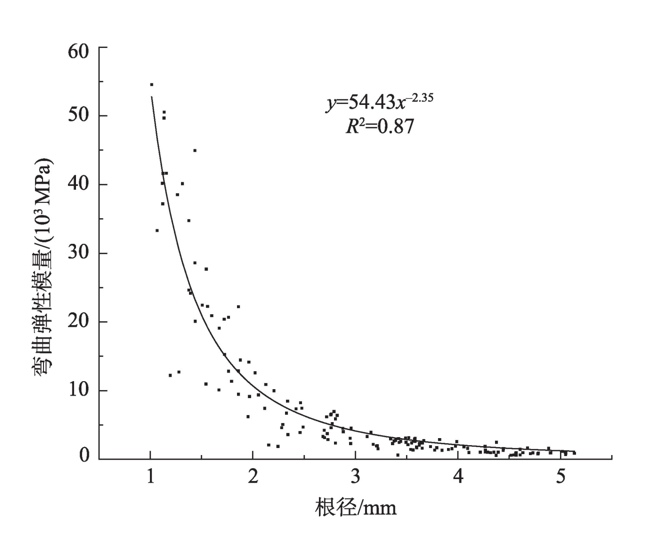


图11 直根弯曲弹性模量

Fig. 11 Bending modulus of straight root

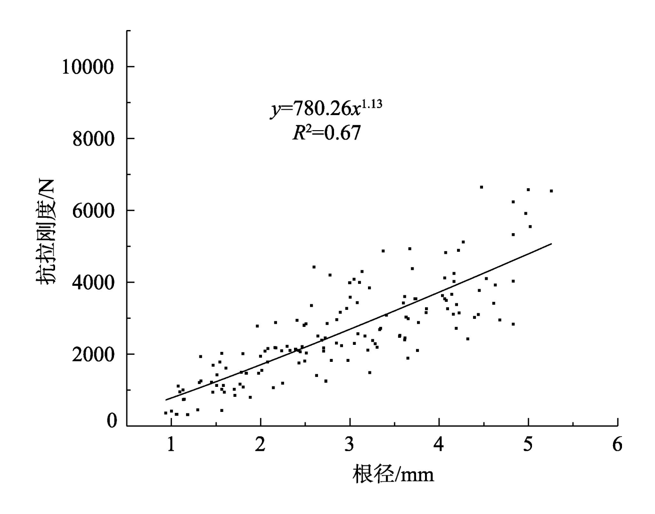


图12 直根抗拉刚度

Fig. 12 Tensile stiffness of straight root

dactylon)、山杨(*Populus davidiana*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、细茎冰草(*Agropyron trachycaulum*)等单根抗拉力、抗拉强度随根径变化关系相同[14-16]。同种植物不同根径间力学性质随根径变化的关系取决于微观结构的差异,张乔艳等[17]发现根截面管孔径随根径的增大而增大,即根径增加,截面单位面积上绝对受力面积增加,但有效受力面积占比降低,存在应力集中现象;同时导管排列趋于复杂、均匀程度变低及木质部与根皮面积比发生变化,导致强度与根径呈负相关关系。

同种植物不同径级根系发挥的固土作用存在差异,Ghestem等[18]发现乔木或草本根系较细根部分可以显著提高根土复合体的残余强度。张强等[9]研究黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)根土界面摩擦特性时发现1~2 mm径级范围内根系可以有效的增强根土复合体的拉拔摩阻强度。本试验从单根弹性模量的角度对细根加筋进行解释,弹性模量随根径的增加呈下降趋势,在相同应变下,越细的根可以承受越多的应力。另一方面,植物根系的锚固效果多由较粗根提供,Dorval等[7]认为沙地土壤中灌木根系的锚固作用主要受较粗根的抗弯刚度影响。苏禹[19]对整株小叶锦鸡儿、中国沙棘等植物进行原位剪切试验时发现,随剪切力的增加,径级小于2 mm的根首先发生变形、断裂;剪切力达到极限剪切力的70%时,大量毛细根被剪断或拔出,主根或较粗根表现为滑移,仍锚固在土体中。相比于毛细根,刚度较大的较粗根在受到外力时不易变形,更好的维持土体的稳定。不同径级根段变形性质的差异的内在表现为微观结构的差异,蒋坤云等[20]对油松

等5种植物不同径级根系切片的研究表明:随根径增大,韧皮部所占根截面百分比减小,木质部所占根截面百分比增大。而韧皮纤维细胞较长,约为1~2 mm,坚韧而有弹性,宏观表现为较强的伸缩性能;木纤维细胞较短,约为1 mm,壁厚且高度木质化,木质部所占根截面百分比较大的根段表现为较强的机械锚固作用,但韧性较低,宏观表现为较大的刚度[21]。

传统根系固土模型如垂直根模型(WWM)和纤维束模型(FBM)均假设根土复合体中所有根系为受拉的杆件[22],实际中错综复杂的根系会受到多方向的外营力。而目前对同种植物根系在轴向、径向荷载下力学性质差异的研究较少,且集中于根段强度特征的比较。植物单根强度特性在2种荷载下的差异受物种而异,中国沙棘、黑沙蒿等植物直根表现为轴向荷载下的极限力、强度均大于径向荷载,小叶锦鸡儿、北沙柳则相反[23],由于忽略了根系在径向荷载下的力学特性,导致上述2个模型会高估径向荷载下根系更易断裂的植物的固土能力。另一方面,根系固土功能的发挥具有长期性,而根系发生破坏后会影响后期的固土功能的发挥。以紫穗槐为例,紫穗槐直根在2种荷载下的极限力、极限强度表现为无差异性。但结合前文可知,轴向及径向荷载下,紫穗槐直根弹性极限点占极限应力百分比分别为41.63%~67.86%、24.10%~44.63%,轴向荷载下直根弹性变形范围更大,发生的位移更小,表现出更为优良的弹性受力性能。仅考虑根断裂时,紫穗槐直根在轴向荷载及径向荷载下固土效果一致,当考虑根系持续发挥固土效能时,紫穗槐直根在轴向荷载下位移更小,弹性极限范围更高,多发生可恢复的弹性变形,表现出更优良的力学性能。

4 结 论

(1) 1~5 mm径级范围内紫穗槐直根分别承受轴向、径向荷载时,极限力均与根径呈幂函数正相关,极限强度均与根径呈幂函数负相关。随径级增长,轴向、径向荷载下的平均极限力分别由(47.98±19.06)N、(40.90±22.70)N增加至(208.93±73.23)N、(262.92±119.9)N,各径级平均极限强度分别由(40.43±16.24)MPa、(31.88±14.91)MPa减小至(11.65±4.81)MPa、(12.91±3.15)MPa。

(2) 分别承受轴向、径向荷载下,直根本构曲线均呈现为由弹性变形过渡到塑性变形,轴向荷载下极限应变(15.04%)显著小于径向荷载(20.39%),2种荷载下,根系的弹性特征差异较大,轴向荷载下的各径级平均弹性应力占极限应力的百分比(50.45%)显著大于径向荷载(34.08%)。紫穗槐根系在轴向荷载下的弹性性能优于径向荷载,根系所受到的轴向荷载多转化为可恢复的弹性变形,发生更小的变形。作为固土植物种时,紫穗槐更适宜栽种于主荷载类型为轴向荷载的风力、水力侵蚀区域。

(3) 对于4 a生紫穗槐而言,1~2 mm径级范围内直根的拉伸弹性模量及弯曲弹性模量均显著大于2~5 mm径级范围内直根,而抗拉刚度、抗弯刚度显著小于2~5 mm径级范围内直根。即小于2 mm的直根强度大,在根土复合体中发挥加筋作用,而大于2 mm的直根刚度大,凭借自身形态抵抗土体变形,在根土复合体中发挥锚固作用。

参考文献(References):

[1] Capilleri P P, Cuomo M, Motta E, et al. Experimental investigation of root tensile strength for slope stabilization[J]. Indian Geotechnical Journal, 2019, 49(6): 687−697.

[2] Abdi E. Root tensile force and resistance of several tree and shrub species of hyrcanian forest, Iran[J]. Croatian Journal of Forest Engineering, 2018, 39(2): 255−270.

[3] Sadovsky A V, Baldi P F, Wan Y M A. Theoretical study of the in vivo mechanical properties of angiosperm roots: Constitutive theories and methods of parameter estimation[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2007, 129(3): 483−487.

[4] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Root biomechanical properties during establishment of woody perennials[J]. Ecological Engineering, 2017, 109(11): 196−206.

[5] 刘鹏飞, 刘静, 朱宏慧, 等. 4种植物生长旺盛期侧根分支处与相邻上级直根抗折特性的差异[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 33−39. [Liu Pengfei, Liu Jing, Zhu Honghui, et al. Difference of anti-fracture mechanical characteristics between lateral-root branches and adjacent upper straight roots of four plant species in vigorous growth period[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 33−39.]

[6] 张欣, 刘静, 郑永刚, 等. 4种植物直根抗折力和抗折强度的研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 338−342. [Zhang Xin, Liu Jing, Zheng Yonggang, et al. Study on the anti-fracture mechanical properties of four kinds of straight roots[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5): 338−342.]

[7] Dorval A D, Meredieu C, Danjon F. Anchorage failure of young trees in sandy soils is prevented by a rigid central part of the root system with various designs[J]. Annals of Botany, 2016, 118(4): 747-762.

[8] Mickovski S B, Bengough A G, Bransby M F, et al. Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems[J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58(6): 1471-1481.

[9] 张强, 刘静, 李强, 等. 黑沙蒿与粉土质砂根-土及土-土界面摩阻特性[J]. 西北农业学报, 2019, 28(3): 489-496. [Zhang Qiang, Liu Jing, Li Qiang, et al. Friction characteristics of root-soil and soil-soil interface of *Artemisia ordosica* and silty sand[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(3): 489-496.]

[10] 王博, 刘静, 王晨嘉, 等. 折力损伤自修复对干旱矿区小叶锦鸡儿根系固土的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1459-1467. [Wang Bo, Liu Jing, Wang Chenjia, et al. Effects of self-healing of *Caragana micophylla* on root soil reinforcement in arid diggings [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1459-1467.]

[11] 杜明新, 周向睿, 周志宇, 等. 毛乌素沙南缘紫穗槐根系垂直分布特征[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 125-132. [Du Mingxin, Zhou Xiangrui, Zhou Zhiyu, et al. Vertical root distribution characteristics of *Amorpha fruticosa* on southern Mu Us Sandy Land[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(2): 125-132.]

[12] YB/T 5349-2014 金属材料弯曲力学性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [YB/T 5349-2014 Metallic Materials-Determination of Bending Mechanical Porperties[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.]

[13] 申向东, 郭松年. 材料力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. [Shen Xiangdong, Guo Songnian. Mechanics of Materials [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005.]

[14] 嵇晓雷, 杨平, 王磊. 狗牙根根系抗拉强度试验[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(23): 5941-5948. [Ji Xiaolei, Yang Ping, Wang Lei. Experiments on root tensile strengths of bermuda grass[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(23): 5941-5948.]

[15] 田佳, 卞莹莹, 于江珊, 等. 3种乔木单根及根土复合体力学特性[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 123-129. [Tian Jia, Bian Yingying, Yu Jiangshan, et al. Mechanical properties comparison of single root and root-soil composite of three arbor species in Helan Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 123-129.]

[16] 刘昌义, 胡夏嵩, 赵玉娇, 等. 寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 1-10. [Liu Changyi, Hu Xiasong, Zhao Yujiao, et al. Strength characteristics of single root tensile test of herbs and shrubs in cold and and environments[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 1-10.]

[17] 张乔艳, 唐丽霞, 廖华刚, 等. 多花木蓝根截面微观结构对其抗拉特性的影响[J]. 植物生态学报, 2019, 43(8): 709-717. [Zhang Qiaoyan, Tang Lixia, Liao Huagang, et al. Effect of microstructure in cross section on tensile properties of indig of eraambly antha[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(8): 709-717.]

[18] Ghestem M, Guillaume V, Alain B, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance [J]. Plant & Soil, 2014, 377(1/2): 43-61.

[19] 苏禹. 4种植物根系受剪受损愈伤后的抗剪特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017. [Su Yu. The Shear Characteristics of Four Kinds of Plant Root Damaged by Shear Stress After Its Self-repairing[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.]

[20] 蒋坤云, 陈丽华, 盖小刚, 等. 华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 115-123. [Jiang Kunyun, Chen Lihua, Gai Xiaogang, et al. Relationship between tensile properties and microstructures of three different broadleaf tree roots in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 115-123.]

[21] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 40-46. [Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoqing, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 40-46.]

[22] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1171-1177. [Zhou Yunyan, Chen Jianping, Wang Xiaomei. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(6): 1171-1177.]

[23] 李有芳, 刘静, 张欣, 等. 4种植物生长旺盛期根系易受损的外力类型研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 339-344. [Li Youfang, Liu Jing, Zhang Xin, et al. The vulnerability of the roots by exogenetic forces of 4 plants in vigorous growth period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 339-344.]

Deformation characteristics of the straight roots of *Amorpha fruticosa*

BAI Luyi[1],　LIU Jing[1],　HU Jinghua[1],　ZHANG Xin[2],　LI Shiwen[1]

(1. College of Desert Contral Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot　010019, Inner Mongolia, China; 2. Institute of Water Resources for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: The strength characteristics, constitutive relation, and elastic deformation characteristics of the straight roots of Amorpha fruticose, with diameters of 1−5 mm, were measured using a TY8000 servo control testing machine to clarify the mechanical properties of the materials of the plant roots under axial or radial loads. We found that the limit force was negatively correlated and limit strength was positively correlated with root diameter as a power function. When the stress-strain curve (σ-ε curve) was calculated from elastic deformation to plastic deformation under two type loads, there was no significant difference between the ultimate stress and elastic stress of straight roots, but the ultimate strain (15.04%) and elastic strain (2.71%) under axial load were significantly smaller than the radial load (20.39%, 4.19%). The tensile modulus and bending modulus were negatively correlated with root diameter as a power function, and the tensile stiffness and bending stiffness were positively correlated with root diameter as a power function. The percentage of the average elastic stress to the ultimate stress under axial load of each diameter level (50.45%) was significantly higher than the radial load (34.08%). Overall, the elastic property of root system is better under an axial load, and *Amorpha fruticosais* best suited to planting in an area of wind and hydraulic erosion where the primary load type is axial load.

Keywords: axial load; radial load; strength; deformation; *Amorpha fruticosais*



